

Gammaforrások statisztikus vizsgálata

Horváth István

Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem,

Bolyai János Katonai Műszaki Kar (horvath.istvan@zmne.hu)

Történeti bevezető

A gammakitörések hatvanas évekbeli felfedezése óta több csillagászati műholdon helyeztek el gammadetektorokat ezen kitörések megfigyelése céljából. Az egyik első, kizárólag e célra készített eszköz az 1991-től 2000-ig üzemelő *Compton* űrtávcső (*CGRO*, Compton Gamma-Ray Observatory) volt, amely több kitörést figyelt meg negyedév alatt, mint amennyit működése előtt összesen felfedeztek. Fedélzetén négy műszer kapott helyet, amelyek közül a legfontosabb a nyolc nagy felületű detektorból álló Burst And Transient Source Experiment (BATSE) volt. A detektorokat a téglatest alakú CGRO sarkain helyezték el, így egy adott kitörést több detektor is észlelt. Ezek együttes adataiból viszonylag pontosan meghatározhatták a kitörések irányát. Kiderült, hogy eloszlásuk az égbolton izotrop, amely rácsfolt a galaktikus forrás elméletekre (Fishman et al. 1994).

Időtartamuk szerint az egyes felvillanások két csoportba sorolhatók (1. ábra) (Kouveliotou et al. 1993). Az első típus a rövid kitörések. A második típus a két másodpercnél is tovább tartó kitörések, ezekenél viszont a kibocsátott fotonok energiája alacsonyabb az első típusúakénál.

További adatokból arra lehetett következtetni, hogy a megfigyelt gammakitörések két egymástól különböző fizikai folyamatban jöhetnek létre. Több kutató – köztük a cikk szerzője – ezen is túlmennek, és a rendelkezésre álló adatok alapján háromféle kitöréstípus mellett érvelnek (Horváth 1998, 2002).

1997-ben, a holland–olasz együttműködésben épült *BeppoSAX* műhold röntgensugárzást tapasztalt egy nem sokkal azelőtt felfénylett gammakitörés helyén (Costa et al. 1997). Később optikai hullámhosszakon is megfigyelték a jelenséget, és megállapították, hogy a kitörés távoli galaxisból származik. Vöröseltolódás-mérések alapján kiderült, hogy a sugárforrások átlagos távolsága nyolcmilliárd fényév, de találtak olyan kitörést is, amelynek fénye több mint tizenkétfélmilliárd évet utazott ideig. A kitörések kozmikus eredete ezzel bizonyosságot nyert.

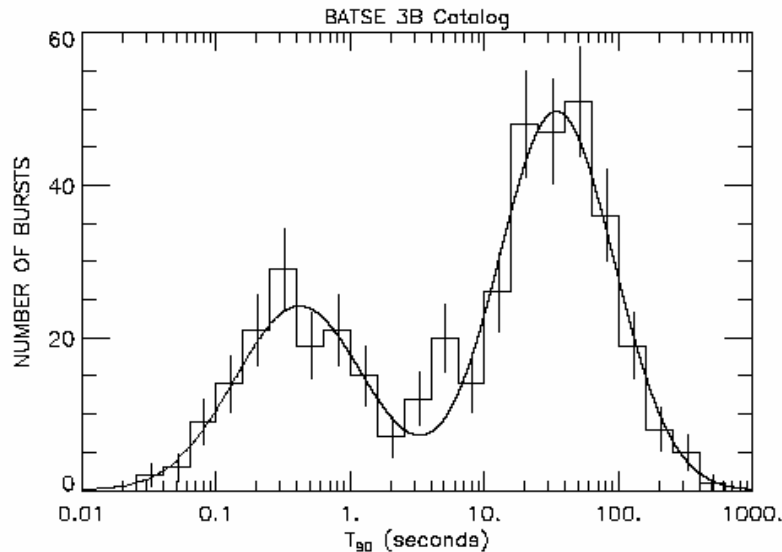
Napjainkban a *Swift* és a *Fermi* műholdak már statisztikai szempontból is sok kitörésnél figyeltek meg utófényt és mértek meg vöröseltolódást. Az amerikai *Swift* műhold mérte meg a jelenleg ismert kitörés-távolságoknak több mint kétharmadát, azonban az alacsony költségvetés miatt a gammatartományban komoly mérések végzésére nem alkalmas, érzékenységeinek felső határa mindössze 150 keV (http://swift.gsfc.nasa.gov/docs/swift/about_swift/).

Érdemes megemlíteni, hogy a *Swift* által mért vöröseltolódások átlaga ($z=2,6$) jelentősen eltér a más műholdak által mértektől ($z=1,2$) (Bagoly et al. 2006).

A távoli eredet miatt le kellett vonni a következtetést, miszerint a gammakitöréseket kiváltó folyamatban sokkal rövidebb idő alatt, sokkal nagyobb energia szabadul fel, mint amekkorát bármely eddig ismert folyamat megenged. Ha az energiakibocsátást izotropnak feltételezzük, nagyjából azzal egyenértékű, mintha a Nap teljes tömege néhány tized másodperc alatt szétsugározná (kb. 10^{51} – 10^{54} erg). Az energia ilyen mértékű felszabadulására két általánosan elfogadott elmélet létezik (Balázs et al. 2003).

A hosszabb ideig tartó, de lágyabb, azaz az energia nagy részét inkább kisebb energiájú fotonokban kisugárzó kitöréstípust az ún. hipernóva jelenséggel magyarázzák. Ha egy legalább negyven naptömegű csillag elégeti nukleáris fűtőanyagát, végül fekete lyukká esik össze. Amennyiben a csillag tengely körüli forgása gyors, a bezuhanó anyag egy ún. akkréciós korongba sűrűsödik össze. Ekkor a csillaganyag jelentős része az egyenlítő síkjában, spirális pályán száguld a középpont felé, ami a hatalmas gravitációs erő következtében egyfajta generátorként működik.

Vagyis energiává alakítja az akkréciós korong anyagának egy részét, két igen vékony, forgástengely irányú nyalámban (jet) kisugározva azt.



1. ábra. A gammakitörések időtartam-eloszlása

Ezt az elképzelést támasztja alá, hogy a pontosabb megfigyelések szerint az ilyen kitörések a galaxisoknak azon aktív vidékeiről származnak, ahol éppen csillagok keletkeznek. Ugyanis itt jönnek létre azok a nagy tömegű, éppen ezért igen rövid életű csillagok, amelyek halálakor megfigyelhető a jelenség. Egy másik bizonyíték, hogy több ilyen kitörés helyén egyúttal szupernóva-robbanást is megfigyeltek, ennek közepén marad végül a fekete lyuk. Az pedig, hogy a gammasugárzás csupán két szűk nyalámban indul útjára, jelentősen, akár három nagyságrenddel is lecsökkenti a kitöréshez szükséges energia mennyiségét. Ez persze azt is jelenti, hogy csak akkor vesszük észre a jelenséget, ha a jet éppen felénk mutat.

A rövid, de keményebb kitörések keletkezését neutroncsillag-kettősök összeolvadásával próbálják magyarázni. A neutroncsillag nagy – de az előbb említetteknél jóval kisebb – tömegű csillagok halálakor keletkezik, anyaga sűrűbb, mint bármi másé az univerzumban. Az egymás körül keringő két neutroncsillag az általános relativitáselmélet szerint gravitációs hullámokat sugároz ki, ennek következtében energiát veszít, és spirális pályán egyre közelebb kerül egymáshoz. Az ütközéskor fekete lyuk keletkezik, körülötte egy hatalmas, relativisztikus sebességgel táguló tűzgolyóval, amely a környező gázcsomóknak ütközve gamma- és röntgensugárzást bocsát ki. A mérések alapján az ilyen típusú gammakitörések általában nem jönnek olyan messziről, mint a hosszúak, és keletkezési helyük is változatosabb. Az egyik probléma ezen elgondolással nem az, hogy hogyan tud néhány tized másodperc alatt ennyi energiát kibocsátani a rendszer, hanem az, hogy miért nem rövidebb idő (ezred másodpercek) alatt történik az emisszió.

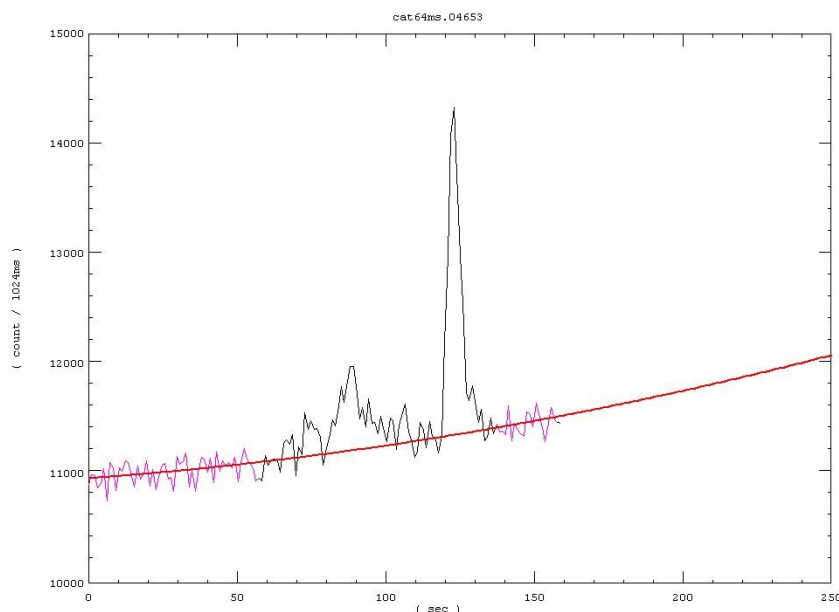
A legújabb (2008-ban pályára állított) műhold, a *Fermi* két műszere, a LAT és a GBM jól kiegészíti egymást, előbbi a nagyobb, utóbbi a kisebb energiákon figyeli meg a gammakitöréseket. Mivel a GBM látótere a teljes égboltot lefedi, kitörés észlelése esetén időben jelezni tudja irányát a LAT-nak – és a többi, a földön vagy a világűrben elhelyezett teleszkópnak. A GBM méréseiből katalógust kívánnak létrehozni, amely többek között tartalmazza a kitörések fluenciáját, csúcspontosságát és időbeli lezajlását. Az állandó adatrögzítésnek köszönhetően utólag olyan gammakitörések nyomait is lehet majd keresni, amelyeket valós időben nem észleltek a detektorok. Ez háromszorosára növeli a GBM érzékenységét ($0,35 \text{ foton/cm}^2/\text{s}$). A két műszer együttes megfigyelései magyarázattal szolgálhatnak a gammakitörések alacsony (keV/MeV) és nagy energiájú (GeV) gammafoton-kibocsátása közötti kapcsolatra, amely megfelelő detektorok híján a mai napig nem tisztázott. Emellett az eddigieknél sokkal részletesebb energiaspektrumot adhatnak, ugyanis a

jelenleg rendelkezésre álló adatok nem mutatják meg egyértelműen, milyen módon történik az energia kibocsátása.

Időtartam-vizsgálatok

A gammakitörések hosszának a definiálása önmagában sem könnyű feladat, ugyanis az egyes fotonokról nem tudhatjuk, hogy milyen irányból érkeztek (a SWIFT műhold megfigyeléseit kivéve), ezért a háttér és a forrás fotonjai megkülönböztethetetlenek. Tehát, hogy mikor kezdődött és ért véget a kitörés, gyakorlatilag meghatározhatatlan. A 2. ábrán látható egy „gammafénygörbe”. Természetesen a kitöréshez tartozó időtartam alatt is érkeznek fotonok a háttérből. Ezért fontos feladat a háttér szintjének és időbeli viselkedésének meghatározása. Ehhez ismernünk kell, hogy mikor volt a kitörés. Ebből a circulus viciosus-ból a kivezetőt a háttér biztos kijelölése jelenti.

A kitörések hosszának (T_{90}) vizsgálata mindig is fontos kutatási terület volt. Már a nyolcvanas években felvetették Mazets és társai (1981), hogy az időtartamok eloszlásában egyenetlenségek lehetnek, ezáltal a kitörések esetleg csoportosíthatóak. E felvetés igazolásához nagyméretű, homogén mintára volt szükség. A CGRO sok feladata közül éppen ez volt az egyik. Ez a minta az első BATSE katalógus (Fishman et al. 1994) megjelenésével rendelkezésre állt. A katalógus 260 megfigyelt kitörésére 222 esetben volt lehetséges az időtartam meghatározása. Ezen időtartamok eloszlását vizsgálták meg Kuveliotou és társai (1993). Az eloszlást az említett cikk alapján az 1. ábra mutatja. Később kiderült, hogy az így azonosított rövid és hosszú kitörések más lényeges tulajdonságokban is különböznek egymástól. Kuveliotou-ék a két eloszlásbeli maximum közötti részt parabolikusan illesztették, és a minimum helyét nagyjából 2 másodpercnél találták meg (1. ábra).



2. ábra. A 04653 jelű kitörés „fénygörbéje”

Az említett BATSE katalógus több részből áll. Három fő táblázat található meg a <http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/catalog/> internetcím alatt. A basic táblázatban olyan alapadatok vannak felsorolva, mint a katalógusszám (trigger number), a megfigyelés napja, ideje, a kitörés égi koordinátái stb. A Flux and Fluence táblázat tartalmazza az azonosító számon kívül a fluencia adatot, ami az adott frekvencia tartományban a kitörés teljes ideje alatt a kitörésből beérkező összes energiát jelenti. Ez lényegében a fénygörbe integrálja a háttér levonása után. A flux vagy csúcsfényesség (peak flux) adat lényegében a fénygörbe maximális értéke. Háromféle

csúcsfényességet tüntetnek fel, mely a három időskála használatából következik (1024, 256 és 64 ezred másodperc). A 2. *ábra* mutatja a 4653 jelű kitörés megfigyelt intenzitásgörbáját.

A 3B BATSE katalógus 1122 kitörést tartalmazott. Az időtartam-táblázatban 834 kitörés adatai voltak megtalálhatók. A fluxustáblázatban és az időtartam-táblázatban is megtalálható kitörések száma 797 volt. Ez kevesebb, mint a 834 kitörésszám, viszont a további tanulmányozáshoz szükség lehet a fluxus és fluencia értékére, ezért célszerű azon kitöréseket tanulmányozni, amelyekre a teljes adatsor rendelkezésre áll. A 3B katalógus időtartamadatai (T_{90}) a 3. *ábrán* vannak ábrázolva. Mivel a kitörések időtartamai 4-5 nagyságrendet fognak át, a század másodperces skálától a több száz másodperces skáláig, célszerű az adatokat logaritmikus skálán ábrázolni, ahogyan azt a már eddig idézett cikkek *ábráin* is láthattuk (3. *ábra*).

Az *ábrán* az eloszlás több csúcsot is mutat. Jól elkülöníthető a hosszú és a rövid kitörések csoportja. De közöttük is látható egy „újabb” csoport. E csoport létét vagy nem létét (esetleg csak véletlen fluktuációról van szó) 1998-ban vizsgáltam meg (Horváth, 1998).

A vizsgálatok során a χ^2 próbát alkalmaztam. A χ^2 próba akkor alkalmazható, ha a minta mérési pontjaihoz ismerjük azok hibáit. Jelen esetben beütésszámokról van szó, tehát Poisson-eloszlást feltételezve a hiba a beütésszám négyzetgyöke. Ha az x_i pontokban egy $f(x)$ függvény illesztése történik, akkor

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(f_i - f(x_i))^2}{\sigma_i^2} \quad (1)$$

ahol σ_i a már említett hiba, illetve a beütésszám négyzetgyöke. A χ^2 várható értéke bizonyos feltételek mellett $N-\nu$, ahol ν az illesztett paraméterek száma (N a mérési pontok száma). Ha a hiba eloszlása korrelálatlan Gauss-eloszlás, akkor a χ^2 eloszlása ismert, és így a várható értéktől való eltérés valószínűsége megadható.

Mivel a kitörések hosszának eloszlása lognormálisnak látszik, ezért a logaritmikus eloszlást célszerű Gauss-görbékkel illeszteni. Bár az előzőekből már kitűnt, hogy létezik az irodalomban elfogadott hosszú és rövid kitörések csoportja, a fittelést a korrekt matematika kedvéért egy Gauss-illesztéssel kell kezdeni. Ezen kétparaméteres fit valószínűsége 0,1%.

A *nullhipotézis* jelen esetben: Az eloszlás egyetlen Gauss-görbével leírható adathalmaz megfigyelt adataiból kapható. Ezért 0,001 annak a valószínűsége, hogy a nullhipotézis igaz. Vagyis nagy szignifikanciával mondhatjuk, hogy a mérési adatok nem írhatók le egy lognormális eloszlással.

A *második nullhipotézis*: Az eloszlás egy 2 Gauss-görbével leírható adathalmaz megfigyelt adataiból kapható.

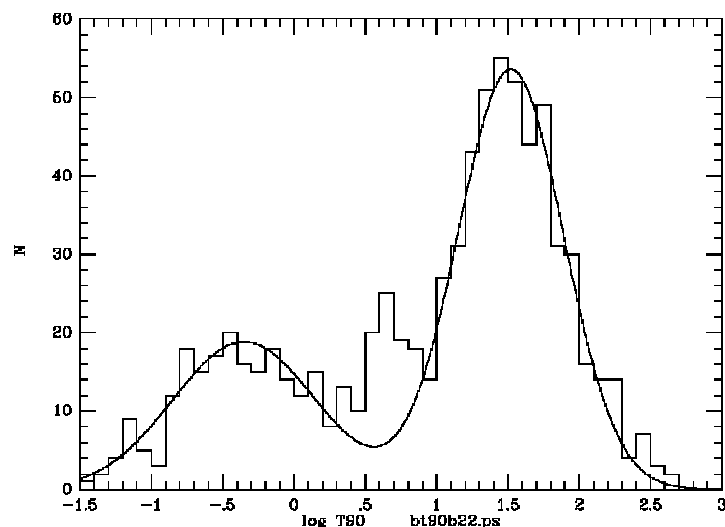
Az illesztést χ^2 módszerrel végeztem, a legjobb χ^2 46,8 volt, ami 40% valószínűségnek felel meg. Tehát ezt a nullhipotézist nem vethetjük el. Lehetséges, hogy az alaphalmaz, amiből az adataink származnak, két Gauss-görbével leírható.

Ez az illesztés látható a 3. *ábrán*. A két normális eloszlás összege feltűnően jól egyezik mind a két „szárnyon”, de jól látható, hogy ahol az „elméleti” görbe minimális, a megfigyelt görbe nem minimális, sőt jelentős eltérés tapasztalható.

A csillagászati spektroszkópiában ez jól ismert jelenség. A spektrum jól illeszthető egy elméleti spektrummal, viszont lehetnek lokális eltérések az elméleti és a megfigyelt görbék között. Ott ezek tipikusan spektrumvonalakat jeleznek. Az ott használt módszer, az F-teszt jelen esetben is alkalmazható.

Ehhez egy három Gauss-görbe összegeként előálló elméleti görbét kell illeszteni. Ez esetben a kapott χ^2 érték 24. Ez önmagában még semmit nem mond, viszont levonva a két Gauss-összegénél kapott legjobb χ^2 -ből, a kapott $46,8-24,0=22,8$ érték megmondja az F-teszt valószínűségét. Mivel a második elméleti görbe 3 új paramétert is használ, a valószínűség egy három szabadsági fokú χ^2 -eloszlását követi. A 22,8-nak nagyon alacsony, 10^{-4} valószínűség felel meg. Tehát ilyen kicsiny annak

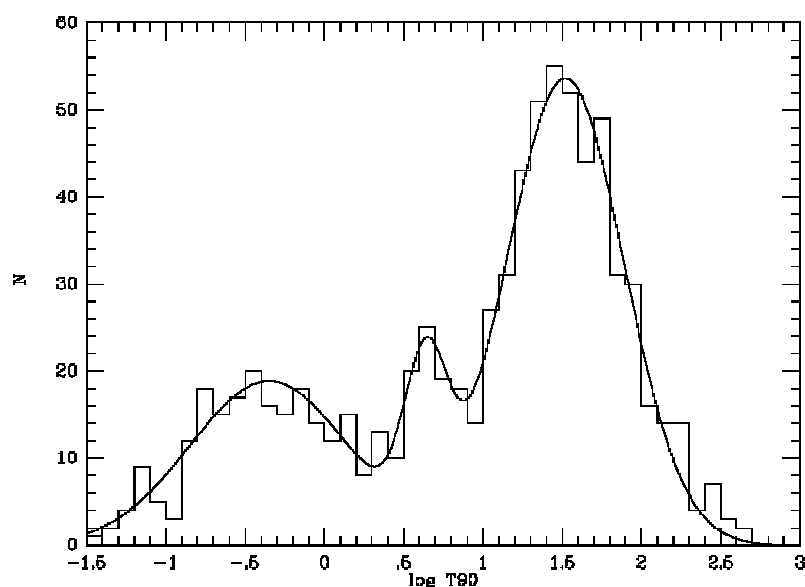
a valószínűsége, hogy véletlenül előálljon egy, a mérésnél kapott eloszlás. A legjobb 3-Gauss-illesztést a 4. ábra mutatja.



3. ábra. Az időtartamok eloszlása a 3B katalógus alapján

Az egyezés jónak mondható, ami nem meglepő 8 illesztett paraméter esetén. A fenti eredményeket közlő *Astrophysical Journal* kötetben jelent meg egy másik cikk (Mukherjee et al., 1998), amely ugyancsak a gammakitörések csoportjaival foglalkozott. Többváltozós analízist alkalmazva 6 dimenziós térben (tehát 6 mért paramétert használva) vizsgálták meg a kitörések csoportosíthatóságát, és hasonlóan három csoport létét látták statisztikusan igazolva.

Sajnos a Compton műhold 2000. május 26-án befejezte működését. A CGRO 1991. április 19. és 2000. május 26. között több ezer eseményt rögzített (triggerelt). Ezek közül 2702 került rögzítésre mint gammakitörés. A megfigyelt adatokat a BATSE Végleges Katalógusban (Final BATSE Catalog) lehet elérni (http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/batse/BATSE_Ctlg/index.html). Az időtartam-táblázatban 2041 kitörésre található T_{90} adat. A további elemzések érdekében ezek közül azon 1929 kitörés adatait használtuk, amelyekről fluxusadatok is rendelkezésre álltak.



4. ábra. A 3B katalógus adataira illesztett 3 Gauss-eloszlás

A T_{90} kitöréshosszak eloszlásának sűrűségfüggvényét az 5. ábra mutatja. A középső csoport ezen az ábrán nem annyira szembetűnő, mint az a korábbi adatokban volt. Az előző fejezetben használt χ^2 elemzésnél erőteljesebb a maximum likelihood (ML) módszer. ML esetén nem kell rekeszekbe osztani a mért adatokat. Minden adat önmagában szerepel az elemzés során.

Egy Gauss-görbe illesztése – hasonlóan az előzőekhez – most sem ad jó eredményt. Két Gauss-görbét illesztve 5 illesztendő paraméterünk van. Egy Gauss-görbét 3 paraméterrel írhatunk le; az eloszlás közepe, szórása és amplitúdója (l. a 3. egyenletet). Következésképpen két Gauss-görbe esetén 6 illesztendő paraméterünk van, de van egy feltétel is az amplitúdók összegére. Az amplitúdók összege vagy adja meg az észlelt objektumok N számát, vagy ha a megtalálási valószínűség az illesztett függvény, akkor a teljes integrál legyen 1. A 3. egyenlettel leírt Gauss-eloszlás integrálja 1, tehát az előbb említett feltétel, akkor elégíthető ki, ha az illesztés során használt wegyűtthetők összege 1.

Az illesztésnél használt likelihood függvény az alábbi alakú:

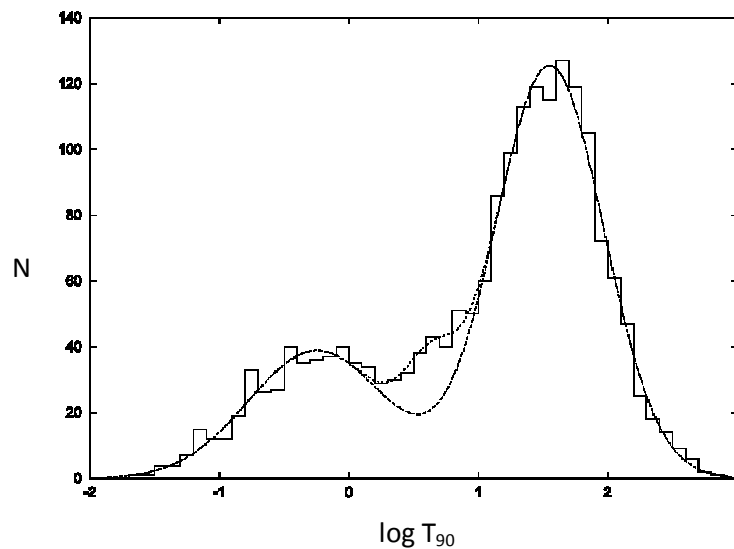
$$L = \sum_{i=1}^N \ln(w_1 f_1(x_i, T_1, \sigma_1) + w_2 f_2(x_2, T_2, \sigma_2)) \quad (2)$$

ahol f_k a már említett

$$f_k = \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - T_k)^2}{2\sigma_k^2}\right) \quad (3)$$

alakú Gauss-függvény. Két Gauss-görbe illesztése esetén L maximális értéke 12320,11 (l. Horváth, 2002). Három Gauss-görbe illesztése esetén L maximális értéke 12326,25. A likelihood maximális értékének javulása várható, hiszen több paraméterrel írjuk le az illesztett elméleti görbét. Jelen esetben 3-mal nőtt a paraméterek száma. Ez esetben a ML értékek különbségének a kétszerese egy 3 szabadsági fokú χ^2 eloszlást követ (Kendall és Stuart, 1976).

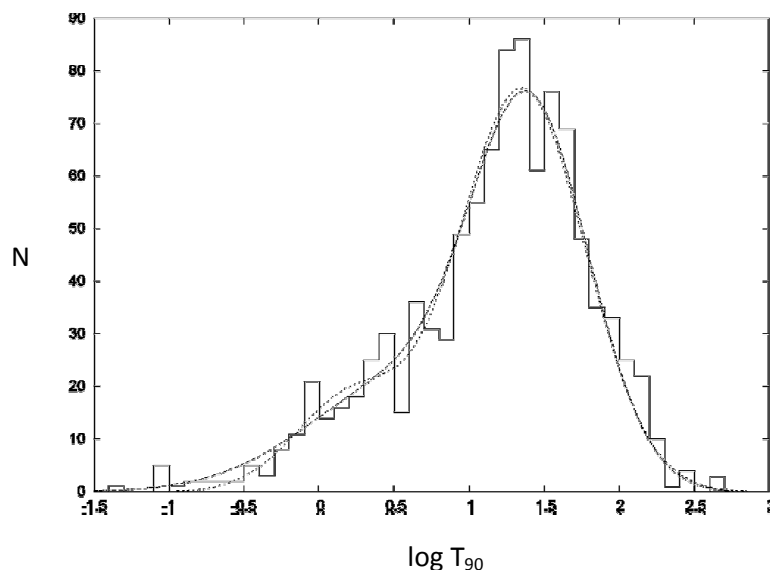
A $2(L_3 - L_2) = \chi_3^2$ képlet alapján számított valószínűség 0,5%. Az illesztéssel kapott „legjobb” görbéket 2, illetve 3 Gauss-görbe esetén az 5. ábra mutatja.



5. ábra. A végső BATSE katalógus adatainak eloszlása

A Beppo-SAX műhold, mint már arról korábban írtunk, legnagyobb felfedezése a kitörések azonosítása volt. A műhold 1996 (az áprilisi fellövését követő beüzemelés után 1996 júliusában történt az első megfigyelés) és 2002 (utolsó megfigyelés áprilisban, megsemmisülés egy évvel később) közötti időszakban több mint ezer gammakitörést figyelt meg. A 2009-ben publikált teljes katalógus (Frontera et al. 2009) szerint 1082 gammakitörést figyeltek meg. A katalógus ezek közül 1003 esetben ad meg időtartamot.

A katalógusban két időtartam van feltüntetve. A szokásos T_{90} és az ún. T_{det} , ami lényegében azon másodpercek száma, amikor a megfigyelt fotonszám a kétszeres szórásnál jobban meghaladta a háttérrel. Jelen fejezet vizsgálataiban a T_{90} -et használtam fel, melynek megfigyelt eloszlását a 6. ábra mutatja.



6. ábra. A Beppo-SAX műhold gammakitörés-adatainak eloszlása

Érdekes az előzőekhez hasonlóan megvizsgálni, hogy az eloszlás hány komponenssel írható le. Maximum likelihood módszert alkalmazva a már ismert módon $k=1, 2$ stb. Gauss-görbét kell illeszteni az eloszlásra. Egy Gauss-görbét illesztve a maximális likelihood $L_{1max}=5951,895$ volt. Két Gauss-görbét illesztve a likelihood maximuma 6011,355 volt. Tehát a növekedés több mint 59, ez sokkal kisebb, mint 10^{-10} -es valószínűségnek felel meg, vagyis a javulás reális. Két Gauss-függvény összegével sokkal jobban leírhatjuk az eloszlást, mint eggyel (Horváth, 2009).

Három Gauss-görbét illesztve a legjobb likelihood 6015,585 volt, így a javulás 4,23. Ennek a duplája 8,46, ami 2%-os valószínűségnek felel meg, vagyis a javulás itt is reális.

Tehát a Beppo-SAX műhold adataiban is kimutatható a harmadik csoport, a közepes gammakitöréseké.

A cikk az OTKA K077795 téma és az MTA Bolyai Ösztöndíj támogatásával készült.

Irodalom:

- Bagoly, Z., et al. 2006, A&A, 453, 797
- Balázs, L. G., et al. 2003, A&A, 401, 129
- Costa, E., et al. 1997, Nature, 387, 783
- Fishman, G. J., et al. 1994, ApJS, 92, 229
- Frontera, F., et al. 2009, ApJS, 180, 192
- Horváth, I., 1998, ApJ, 508, 757
- Horváth, I., 2002, A&A, 392, 791
- Horváth, I., 2009, Ap&SS, 323, 83

- Horváth, I., Balázs, L. G., et al. 2006, A&A, 447, 23
Kendall, M. & Stuart, A., 1976, The Advanced Theory of Statistics, Griffin, London
Kouveliotou, C., et al. 1993, ApJ, 413, L101
Mukherjee, S., et al. 1998, ApJ, 508, 314
Mazets, E. P., & Golentskii, S. V. 1981, Astrophysical Space Physics Rev., 1, 205